

Opinnäytetyö (AMK)

Auto- ja Kuljetustekniikka

NAUTOS13A

2017

Janne Lankila

SÄHKÖ- JA DIESELBUSSIN TCO- JA HIILIJALANJÄLKIVERTAILU FÖLIN LINJALLA 1

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma

2017 | sivumäärä: 40

Ohjaajat: Markku Ikonen, Panu Aho

Janne Lankila

SÄHKÖ- JA DIESELBUSSIN TCO- JA HIILIJALANJÄLKIVERTAILU FÖLIN LINJALLA 1

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on kuvailla eFÖLI-hankkeen sähköbussiliikennöinnin kulu- rakennetta ja samalla vertailla sähköbussiliikennöinnin kilpailukykyisyyttä dieselbussiliikennöintiin nähden. eFÖLI-hanke on Turun sisäisen kaupunkiliikenteen linjalla 1 toteutettava täyssähkö- bussikokeilu, jonka tarkoituksena on kartuttaa tietoa sähköbussien soveltuvuudesta kaupunki- liikennöintiin sekä toimia ensiaskelena Turun bussiliikenteen sähköistämiseksi. Lisäksi työssä esitellään lyhyesti hankkeen vaikutusta linjan 1 liikennöinnin CO₂-päästöihin.

Opinnäytetyö on osa laajempaa Turun kaupungin Turun Ammattikorkeakoulu Oy:ltä tilaamaa eFÖLI-hankkeen tutkimuskokonaisuutta.

Tutkimusmenetelmiin lukeutuu linjalla 1 liikennöivien sähkö- ja dieselbussien kulutusmittaukset, eri kuluerien ja hintojen lukeminen mahdollisuuksien mukaan liikennöitsijälle osoitetuista laskuista, sekä busseihin tutkimushanketta varten asennettujen tiedonkeruujärjestelmien datan prosessointi. Lisäksi hyödynnetään asiantuntijalausuntoja bussiliikennöinnin ammattilaisilta, sekä pilottihankkeen tutkimuksen tukeen sitoutuneilta tahoilta.

Tutkimuksen tuloksena saatiin erilaisiin skenaarioihin perustuvia bussien TCO-malleja. Vertailukohteeksi laskettiin kahden eri dieselbusseihin perustuvan liikennöintimallin TCO:t. Päästöjen osalta tuloksissa eritellään eri bussivaihtoehtojen kilometrikohtaiset päästöt, sekä liikennöintimallien kokonaispäästöt vuodessa linjalla 1.

ASIASANAT:

Joukkoliikenne, elinkaarikustannukset, hiilijalanjälki, sähköbussi

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Automotive and Transportation Engineering

2017 | 40 pages

Instructors: Markku Ikonen, Panu Aho

Janne Lankila

TCO AND CARBON FOOTPRINT COMPARISON OF ELECTRIC AND DIESEL BUSES OPERATING ON FÖLI ROUTE 1

The aim of this thesis was to describe the cost structure of the eFÖLI electric bus project and compare the competitiveness of electric bus traffic to diesel bus traffic. The eFÖLI project is a fully electric bus experiment on the Turku internal public transport line 1 aimed at gathering information on the suitability of electric buses for public transport. It is the first step towards electrification of public transport in Turku. In addition, the thesis briefly describes the impact of the project on CO₂-emissions of the operation on Turku public transport line 1.

This thesis is a part of a larger research project commissioned to Turku University of Applied Sciences by the city of Turku.

The research methods include consumption measurements of the electric and diesel buses running on the line 1, reading of different cost items and prices on invoices to the operator when possible and processing of the data collected from the data logging systems installed on the buses. In addition, expert statements from professionals in the field of public transport as well as those from the parties of the project who are committed to support the research project were utilized.

The thesis offers different TCO model alternatives based on different scenarios of operation. The results can be compared to the TCOs of two different operating scenarios based on two different diesel buses presented in this thesis. For emissions, the results detail the kilometer based emissions of different bus technology alternatives and the total emissions per year on the different operating models on line 1.

KEYWORDS:

Public transport, total cost of operation, carbon footprint, electric bus

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	6
1 JOHDANTO	7
2 EFÖLI- HANKKEEN TAUSTAJÄRJESTELYT	9
2.1 Hankkeen toteutuksen osapuolet	9
2.2 Hankkeen taloudelliset odotukset	10
2.3 Ympäristönäkökulma	10
3 TUTKITTAVAN KALUSTON ERITTELY	13
3.1 Vertailtavat bussit	13
3.2 Latausinfrastruktuuri	13
3.3 Tiedonkeruulaitteisto	14
4 KÄYTETYT TIEDONKERUUMENETELMÄT	15
4.1 Sähköbussin TCO:n laskenta- ja tiedonkeruumenetelmät	15
4.2 Dieselbussin TCO:n laskenta- ja tiedonkeruumenetelmät	18
4.3 Hiilijalanjäljen vertailun tiedonkeruu- ja laskentamenetelmät	19
5 AJOKILOMETRIN KUSTANNUSTEN VERTAILU	20
5.1 Dieselbussin laskennan arvot	21
5.2 Sähköbussin laskennan arvot	21
5.3 TCO-vertailu	22
5.4 Herkkyysanalyysi	24
6 HIILIJALANJÄLJEN VERTAILU	31
6.1 Eri energiantuotantotapojen vaikutus	31
6.2 Eri ajoneuvotyyppien ja niiltä vaaditun kilometrisuoritteiden vaikutus	31
6.3 Tulokset	32
7 TUTKIMUKSEN ARVIOINTI	35
8 YHTEENVETO	38
LÄHTEET	39

KUVIOT

Kuvio 1. Estimates of the life dependencies on the Δ SoC for LTO and LFP batteries. (Pihlatie ym. 2014)	17
Kuvio 2. Vaihtoehtoisten bussien ajokilometrin hinta.	23
Kuvio 3. Linjan 1 operoinnista syntyvät vuosittaiset kalustokohtaiset kulut.	24
Kuvio 4. Kilometrikohtaisten kustannusten herkkyystarkastelu 7 v. käyttöikäskenaarion mukaan.	25
Kuvio 5. Kilometrikohtaisten kustannusten herkkyystarkastelu 10 v. käyttöikäskenaarion mukaan.	26
Kuvio 6. Kilometrikohtaisten kustannusten herkkyystarkastelu 14 v. käyttöikäskenaarion mukaan.	27
Kuvio 7. Linjan 1 liikennöinnin vuosikulut 7 v. käyttöikäskenaarion mukaan.	28
Kuvio 8. Linjan 1 liikennöinnin vuosikulut 10 v. käyttöikäskenaarion mukaan.	28
Kuvio 9. Linjan 1 liikennöinnin vuosikulut 14 v. käyttöikäskenaarion mukaan.	29
Kuvio 10. Kilometrikohtaiset WTW-näkökulman CO ₂ -päästöt.	32
Kuvio 11. Vuosittaiset linjan 1 operoinnista syntyvät WTW-näkökulman mukaiset CO ₂ -päästöt.	33

TAULUKOT

Taulukko 1. Päästövähennemä [tonnia / 6 autoa] (Turun Kaupunginhallitus 2015b.)	11
Taulukko 2. Päästövähennemä [tonnia / 6 autoa] (Turun Kaupunginhallitus 2015b.)	11
Taulukko 3. Well To Wheel -päästöt [tonnia / 6 autoa] (Turun Kaupunginhallitus 2015b.)	12
Taulukko 4. Vertailtavien kaksiakselisten bussien tekniset tiedot rekisteriotteiden mukaan.	13

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

TCO	Total Cost of Ownership, tuotteen koko elinkaaren aikaisia kuluja kuvaava malli.
WTW	Well To Wheels, energialähteen koko elinkaaren mukaista päästökertymää kuvaava malli.
SOC	State Of Charge, akuston varaustila.

1 JOHDANTO

Tämän tutkielman tavoitteena on selvittää eFÖLI-hankkeen vaikutusta Turun Kaupunkiliikenne Oy:n liikennöinnin kustannusrakenteeseen sekä hiilijalanjälkeen Turun kaupungin sisäisen joukkoliikenteen linjalla 1. Suomalaiselta Linkker Oy:ltä vuonna 2016 tilatut kuusi Linkker LE13 -sähköbussia ovat Turun joukkoliikenteessä ensimmäiset laatuaan ja Turun Kaupunkiliikenne Oy:lle tuore hankinta, jonka toimitus on tutkimuksen tekovaiheessa vielä osittain kesken.

Kaupungin viihtyvyyden ja imagon kannalta hankinnasta on suoraa etua vähentyneen melusaasteen, vähentyneiden paikallisten päästöjen sekä vähentyneiden liikenteen kokonaispäästöjen muodossa. Jotta EU:n viimeisiin päästötavoitteisiin päästäisiin, ovat tällaiset ajoneuvokannan muutokset uusiutuvien polttoaineiden kehityksen rinnalla välttämättömiä askeleita. Suomen osalta kaikkien talouden alojen yhteinen kokonaispäästövähennystavoite vuoteen 2005 verrattuna on asetettu 39 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä (EU 2016). Kansallisen energia- ja ilmastostrategian mukaisena tavoitteena on kotimaan liikenteen kasvihuonepäästöjen alentaminen 15 %:lla vuoteen 2020 mennessä verraten vuoden 2005 päästöihin (Trafli 2014).

Jo olemassa olevien sähköbussien TCO-tutkimusten mukaan liikennöitsijöiden olisi tietyn edellytyksin mahdollista jo nykyisillä kaluston, energian ja latausinfrastruktuurin hinnoilla päästä kokonaistaloudellisesti tarkasteltuna samoihin, ja jopa alhaisempiin kilometrikustannuksiin sähköbusseilla verrattuna dieselillä kulkeviin busseihin (Pihlatie ym. 2014). Tämän lisäksi nykyisen ja ennustetun akustojen hinnankehityksen perusteella on turvallista olettaa, että tulevaisuudessa sähköbusseihin vaihtamisessa on potentiaalia tuoda liikennöitsijöiden kokonaiskustannukset alhaisemmiksi siirtymällä täyssähköiseen kalustoon.

Aiheesta on vasta viime aikoina ruvettu saamaan kokemuksia Suomessa, sillä esimerkiksi Espoossa Suomen ensimmäiset sähköbussit aloittivat liikennöinnin alkuvuodesta 2016 (Yle 2017).

Tutkimuskohteiden ollessa osin uutta teknologiaa ei eri komponenttien käyttöiästä ei ole juurikaan saatavilla kokemusperäistä tietoa. Esimerkiksi akuston käyttöiässä joudutaan turvautumaan bussien valmistajan arvioihin ja luottamaan akun takuun voimassaolon edellytyksien täyttymiseen liikennöinnin osalta.

Edellä mainituista syistä johtuen tutkimuksessa tullaan kattamaan erilaisia skenaarioita erilaisten näkökulmien ja herkkyysanalyysien avulla.

2 EFÖLI- HANKKEEN TAUSTAJÄRJESTELYT

Turun kaupunginhallitus päätti kokouksessaan 8.10.2013 § 412 ohjata aktiivisesti sekä omaa että palveluntarjoajiensa kalustoa biokaasu- ja sähkökäyttöiseksi, sekä suosia edellä mainittuja esimerkiksi pysäköintietuuksin. Turun sisäisen bussikaluston osalta päätettiin pyrkiä asteittaiseen siirtymiseen sähkö- ja hybridibusseihin. Pilottilinjan valintaa varten tilattiin Tampereen teknilliseltä yliopistolta diplomityö, jossa arvioitiin mahdollisia tarkoitukseen soveltuvia linjoja sähköbussihankkeen pilottilinjaksi. Linja 1 päättyi valituksi ollen kokonaisuutena sopivan kokoinen sekä yhtenä Turun joukkoliikenteen runkolinjoista keskeinen palvelun kehittämisen kohde. (Turun kaupunginhallitus 2015a.)

Linjan 1 bussien pääkierron kuljetuskapasiteetin säilyttämiseksi työssä esitettiin sähköbussiliikenteeseen siirryttäessä vuorovälin tihennystä 20 minuutista 15 minuuttiin ajoneuvotyyppin muuttuessa 15-metrisistä teliajoneuvoista 12-metrisiksi kaksiakselisiksi sähköbusseiksi. Pääkierto suunniteltiin toteutettavaksi kuudella sähkökäyttöisellä bussilla, ja ruuhka-aikoina sähköbussien lisäksi ylimääräisillä dieselkäyttöisillä telibusseilla. (Turun kaupunginhallitus 2015a.)

2.1 Hankkeen toteutuksen osapuolet

Sähköbussien hankinta ja pilottilinjan operointi päädyttiin toteuttamaan yhteistyössä Turun kaupungin tytäryhtiön Turun Kaupunkiliikenne Oy:n kanssa linjan 1 liikennöinnin sopimuksen päätyttyä LS-Liikennelinjat Oy:n kanssa 30.9.2016. Turun Kaupunkiliikenne Oy:n todettiin olevan luontainen yhteistyökumppani eFÖLI-hankkeen aloittamiseen, koska sillä oli kokemusta hybridikäyttöisistä busseista, ja niiden operointiin liittyvän tutkimustyön tukemisesta. Tytäryhtiön käyttämisen katsottiin lisäksi tuovan hankkeelle tarvittavaa joustavuutta ja vähentävän pilottihankkeen kilpailuttamiseen liittyviä riskejä. (Turun kaupunginhallitus 2015a.)

Latauspalvelun toimittajaksi valittiin Turku Energia. Turku Energia on toteuttanut toimialueellaan sähkökäyttöisten henkilöautojen latauspisteitä ollen luontainen yhteistyökumppani tutkimus- ja kehityshankkeelle. (Turun kaupunginhallitus 2015a.)

Bussien toimittajille osoitettuun tarjouspyyntöön vastasivat Volvo, VDL ja kotimainen Linkker Oy. Tarjouskilpailun voittajaksi valikoitui Linkker Oy (Turun Kaupunki 2015). Linkker Oy on vuonna 2014 perustettu startup-yritys, jonka bussit kootaan Sastamalassa Fortaco Oy:n toimesta.

Hankkeeseen liittyvän tutkimuksellisen osuuden on valittu Turun Ammattikorkeakoulu Oy sekä VTT (Tksjlk 2016a; Tksjlk 2016b).

2.2 Hankkeen taloudelliset odotukset

eFÖLI-hankkeen taustaoletuksena oli, että toistaiseksi sähköbussiliikenne ei kykene taloudellisesta näkökulmasta katsottuna kilpailemaan dieselbussiliikenteen kanssa. Turun kaupunginhallitus on tästä syystä hyväksynyt vuosittaisen enintään 480 000 € määrärahan seitsemän vuoden ajalle hankkeen tukemiseen. Hanketta suunnitellessa esitetty taustaolettamus kuitenkin on, että sähköbussien sarjavalmistuksen kehittymisen, akkuteknologian halpenemisen, latausjärjestelmien kehittymisen ja standardoinnin yhteisvaikutuksen johdosta sähköbussi tulee olemaan elinkaarikustannuksiltaan dieselbussia kilpailukykyisempi jo 2020-luvulla. (Tksjlk 2016c; Turun kaupunginhallitus 2015a.)

Taloudellisesta rasitteesta huolimatta hanke katsottiin tarpeelliseksi jo nyt, jotta saataisiin kerättyä kokemusperäistä tietoa sähköbussien soveltuvuudesta eri linjoille Turussa, sekä dataa sähköbussiliikenteen kokonais- ja elinkaarikustannuksista. (Turun kaupunginhallitus 2015a.)

Kaupunginhallituksen kokouksessa 25.5.2015 § 233 arvioitiin hankkeen kustannuksiksi merkittävilta osin seuraavaa; yksittäisen bussin hinta olisi noin 450.000-500.000 €, liikennöinnin tihentämisen lisävaikutus 300.000 €/vuodessa verrattuna dieselliikenteeseen harvemmallä välillä, pikalatauslaitteet noin 400.000-500.000 € kappaleelta sekä kuuden auton hidaslaturi 100.000 €. Latauspalveluiden investointi ja ylläpito olisi Turku Energian vastuulla, ja näiden kustannus kaupungille 180.000 € vuodessa sopimuskauden ajan. (Turun kaupunginhallitus 2015a.)

2.3 Ympäristönäkökulma

Turun kaupunginhallituksen kokouksen 25.5.2015 § 233 pöytäkirjan liitteessä esitetään sekä ajonaikaisten päästöjen että koko energiaketjun päästöjen (WTW) näkökulmasta

oletukset eFÖLI-pilottihankkeella saavutettavasta CO₂-päästövähennyksestä. Laskelmissa on käytetty dieselbussin ajonaikaisina päästöinä arvoa 1064 g CO₂/km (vastaa kulutusta n. 40 l/100 km), jonka senhetkisen Suomalaisen kaupunkiliikenteen linja-autot keskimäärin jopa ylittävät. Täyssähköautoille on käytetty hiilidioksidin osalta arvoa 0 g/km perustuen Turun kaupungin hankintasopimukseen CO₂-vapaasta sähköstä, jolloin vähenemäksi on oletettu 1064 g/km. Keskimääräisenä vuosittaisena ajosuoritteena on käytetty uuden kiertotiheyden mukaista 110 000 kilometriä vuodessa jokaisella kuudella korvattavalla bussilla. Hankkeen bussien käyttöiäksi oli alustavissa kaavailuissa määritetty vähintään 36 kk leasing-jakso, todennäköisesti keskimäärin 84 kk pitoaika ja maksimissaan 120 kk maksimikesto.

Taulukossa 1 on esitetty edellä mainittujen arvojen perusteella lasketut liikennöinnin ajonaikaiset päästöt. Taulukossa on muiden ajonaikaisten päästöjen osalta käytetty hanketta edeltäneiden bussien Euro 4 -standardia vastaavia arvoja. (Turun kaupunginhallitus 2015b.)

Taulukko 1. Päästövähennys [tonnia / 6 autoa] (Turun Kaupunginhallitus 2015b.)

Aikana	CO ₂	NO _x	HC	PM	CO
12kk	702	9,3	1,2	0,053	3,92
36kk	2106	27,9	3,6	0,159	11,94
84kk	4914	65,1	8,4	0,371	27,86
120kk	7020	93	12	0,530	39,80

WTW-tarkastelunäkökulman mukaan öljynjalostuksen ja -jakelun päästöt huomioon ottaen on saatu CO₂-päästövähennyksiä taulukon 2 mukaiset arvot. Jalostuksen ja jakelun on oletettu lisäävän päästöjä noin 20 %.

Taulukko 2. Päästövähennys [tonnia / 6 autoa] (Turun Kaupunginhallitus 2015b.)

Aikana	CO ₂
12kk	842
36kk	2527
84kk	5897
120kk	8424

Sähköbussien energiankulutuksen päästöt ajosuoritteeseen suhteutettuna on pöytäkirjan liitteessä esitetty taulukon 3 mukaisesti.

Taulukko 3. Well To Wheel -päästöt [tonnia / 6 autoa] (Turun Kaupunginhallitus 2015b.)

Aikana	CO ₂	NO _x	HC	PM	CO
12kk	0	0,265	0	0,022	0,198
36kk	0	0,795	0	0,066	0,594
84kk	0	1,855	0	0,154	1,386
120kk	0	2,65	0	0,220	1,98

Tässä tutkimuksessa CO₂-päästöjä tullaan kuitenkin tarkastelemaan kohteisiin tilattujen pörssisähkön ja fossiilisen dieselin päästöarvojen lisäksi myös kansallisten keskiarvojen mukaan. Muihin päästökomentteihin ei tässä tutkimuksessa puututa.

3 TUTKITTAVAN KALUSTON ERITTELY

3.1 Vertailtavat bussit

Sähköbusseille valittuna kuljetuskapasiteetiltaan Linkker LE13-busseja vastaavana vertailukohteena on Turun Kaupunkiliikenne Oy:n osittain Fölin linjalla 1 kulkeva Scania Omnibus 3200. Kyseisellä Scanian dieselbussilla paikataan liikennöinnin pääkiertoa sähköbussien toimituksen ollessa vielä kesken tutkimusta tehtäessä. Vertailtavien kaksiakselisten bussien tekniset tiedot on eritelty taulukossa 4.

Taulukko 4. Vertailtavien kaksiakselisten bussien tekniset tiedot rekisteriotteiden mukaan.

Bussi	Linkker 13LE	Scania Omnibus 3200 (Euro 6)
Käyttövoima	Sähkö	Dieselöljy
Käyttöönottovuosi	2016, 2017	2015
Istuma/seisomapaikat	39/30	38/42
Suurin nettoteho	208 kW	169 kW
Ajoneuvon omamassa	10165 kg	12375 kg
Tieliikenteessä sallittu suurin kok. massa	16000 kg	18000 kg
Kok. massan ja oma-massan erotus	5835 kg	5625 kg
Pituus	12820 mm	12500 mm
Akseleiden lkm.	2	2
Energiavarasto	LTO-akusto: 55kWh	Dieseltankki

3.2 Latausinfrastruktuuri

Latausjärjestelmä koostuu linjan päätepysäkeille sijoitetuista pikalatureista sekä Turun Kaupunkiliikenne Oy:n varikolle sijoitetusta hidaslaturikokonaisuudesta. Latausasemien verkosta, sähköntoimituksesta, sekä huollosta vastaa Turku Energia.

Lentokentälle ja satamaan sijoitetut pääteasemalaturit ovat Heliox BV:n valmistamia HE9816003-pikalatureita. Latureiden nimellisteho on 300 kW, jolla kyetään lataamaan bussin akusto haluttuun 80 %:n varaustilaan muutamassa minuutissa. Tämä mahdollistaa akun varaustason ylläpidon ilman ylimääräisiä odotusjaksoja ajopäivän aikana. (Heliox 2017a.)

Pikalatureiden pantografit ovat Schunk Carbon Technology PTY LTD:n valmistamia, valmistajan tyyppimerkinnältään SLS 201.102. (Schunk 2016.)

Hidaslaturit ovat niin ikään Heliox BV:n valmistamia, tyyppimerkinnältään HE9815005. Hidaslatureiden maksimiteho on 50 kW, mutta ne konfiguroidaan tuottamaan 22 kW:n tehoa kuuden laturin yhtäaikaisen energiantarpeen hillitsemiseksi. Näillä suoritetaan ajopäivien välinen varaustason ylläpito. Hidaslatureiden kytkentä ei ole pikalatureiden tapaan automatisoitu, vaan ajoneuvo liitetään laturiin johdolla. (Heliox 2017b.)

3.3 Tiedonkeruulaitteisto

Vertailtaviin sähköbusseihin on asennettu Aplicomin A9 NEX -tiedonkeruujärjestelmät EEE Innovations Oy:n ohjelmistolla. Tiedonkeruujärjestelmällä saadaan siirrettyä ajoneuvon tietoja reaaliajassa CAN-väylästä EEE-innovations Oy:n hallinnoimalle palvelimelle. Lisäksi järjestelmä tallentaa bussin paikkatietoa oman sisäisen GPS-järjestelmän avulla.

EEE Innovationsin tiedonkeruudatan lisäksi kirjoittajalla oli käytössään Linkker Oy:n omasta tiedonkeruujärjestelmästä sähköbusseista saatua dataa. Data oli käytettävissä Wapicen IoT-Ticketin kautta harvemmallalla näytteenottotaajuudella verrattuna EEE innovations Oy:n dataan.

EEE Innovations Oy:n järjestelmien kautta päästiin lukemaan myös vertailussa mukana olleen dieselkäyttöisen Scania Omnibus 3200 -bussin dataa.

4 KÄYTETYT TIEDONKERUUMENETELMÄT

Tutkimus suoritettiin pääosin hyödyntäen tutkimuskohteista mitattua dataa. Milloin edellä mainittu ei ollut vaihtoehto, hyödynnettiin asiantuntijalausuntoja Turun Kaupunkiliikenne Oy:n toimitusjohtaja Juha Parkkoselta, Fölin suunnittelupäällikkö Lauri Jorasmaalta, Scania Suomi Oy:n huoltosinsinööri Mikael Mannforsilta, HSL:n kalustosinsinööri Petri Saarelta, Linja-autoliiton liikennepäällikkö Mikko Saavolalta, Turun Ammattikorkeakoulu Oy:n tutkimusinsinööri Panu Aholta, lehtori Rami Wahlstenilta sekä koulutus- ja tutkimusvastaava Markku Ikoselta, Linkker Oy:n talousjohtaja Tom Granvikilta sekä toimitusjohtaja Kimmo Erkkilältä, sekä Linjaliikenne Muurinen Oy:n Kimmo Heinoselta.

Selkeästi yhtenevät kulut, kuten dieselkäyttöisen lisälämmittimen kulutus, hallien ym. rakennusten kulut sekä hallintokulut jätettiin tutkimuksen ulkopuolelle, sillä tutkimuksen tavoitteena on löytää kilometrihinnan sekä vuosikulujen absoluuttinen ero, jolloin edellä mainitut ovat merkityksetöntä tietoa lopputuloksen kannalta. Kuljettajien palkat jätettiin myös tutkimuksen ulkopuolelle, sillä tämä tutkimus pyrkii erittelemään TCO:ta vain kalustosta johtuvien kulujen osalta.

Kokonaiskustannuksia laskettaessa tulisi kuitenkin kalustokohtaisten kulujen lisäksi ottaa huomioon myös henkilöstökulujen osuus. Uudessa liikennöintimallissa linjatunteja kertyy huomattavasti enemmän verrattuna syyskuuhun 2016 voimassa olleeseen liikennöintimalliin, mikä nostaa suoraan henkilöstökuluja.

4.1 Sähköbussin TCO:n laskenta- ja tiedonkeruumenetelmät

Sähköbussien kauppahinta luettiin Linkker Oy:n tarjouksesta, ja latausjärjestelmän hankinta- ja ylläpitokuluina käytettiin Turku Energian vuosittaista laskutusta investointiosasta ja huoltokustannuksista. Huoltokustannukset on eritelty seitsemän vuoden sopimuskauden ajaksi. Niiden oletetaan tässä tutkimuksessa kuitenkin pysyvän suuruusluokaltaan samoina siinäkin tapauksessa, että sopimus jatkuu liikennöintisopimuksen mahdollisen kymmenen vuoden ajan, tai jopa Tom Granvikilta saadun tiedon mukaisen mahdollisen 14 vuoden skenaarion ajan. Huoltosopimuksen mahdollisesti jatkuessa kymmeneen vuoteen asti on Linkker Oy:llä mahdollisuus korjata hintaa indeksin mukaisesti (Tom Granvik, haastattelut).

Sähköbussien huoltosopimuksen mukaiseen huollon kilometrihintaan lisättiin arvioidut rengaskustannukset. Rengaskustannusten suuruus perustuu HSL:n liikennöitsijöiden vuoden 2012 tilinpäätöksistä muodostettuun rengas- ja varaosakustannuksiin ja niiden keskinäiseen jakaumaan. Saatua lukua on tarkasteltu Linja-autoliikenteen kustannusindeksi 2/2017 mukaan töiden osuuden ollessa arvioitu. Linkkerin tarjoama verrattain halpa bussien alustan, voimalinjan ja korin kattava huoltosopimus perustuu pitkään taakkueseen, joka on otettu huomioon linja-autojen ostohinnassa (Tom Granvik, haastattelut).

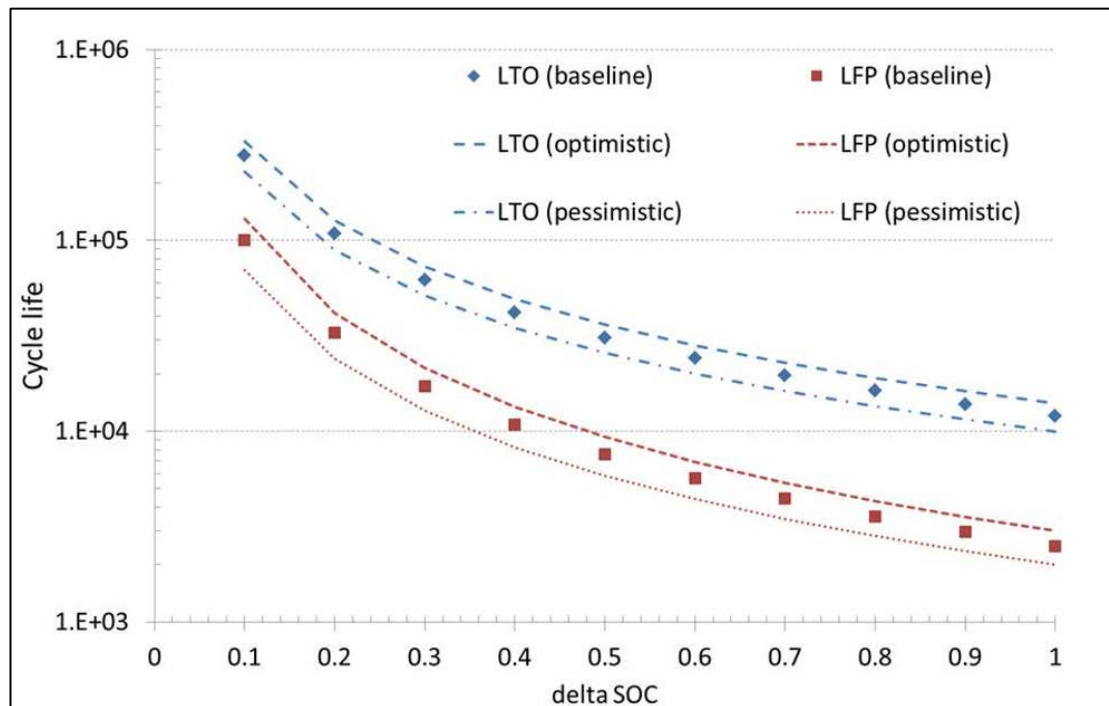
Busseihin asennetuista tiedonkeruujärjestelmistä saatiin tutkimuksen herkkyystarkastelun kannalta tarvittavia arvoja, kuten bussien ajosuorite, akun lataussyklien määrä suhteessa ajosuoritteeseen, akun varaustilan keskimääräiset prosentuaaliset muutokset, sekä energiankulutus bussien väylädatan mukaan. Arvot olivat luettavissa sekä reaaliaikaisesti että taannehtivasti.

Sähköbussien varsinainen kulutustieto saatiin suhteuttamalla Turku Energian laskuttama kilowattituntien määrä vastaavassa ajassa saavutettuun ajosuoritteeseen kaikilla käytössä olleilla sähköbusseilla. Tiedonkeruujärjestelmän raporteista saatua keskikulutusta käytettiin lähinnä tarkistuseläkelmana sähkölaskutukseen perustuvalle lasketulle kulutuksen arvolle.

Sähköbussien käyttöikä valittiin tähän tutkimukseen ja sen herkkyystarkasteluun liikennöintisopimuksen oletetun 84 kuukauden keston ja mahdollisen 120 kuukauden maksimikeston mukaan. Tämän haarukan ulkopuolisena arvona käsitellään lisäksi optimistista skenaariota, jossa akusto vaihdetaan kymmenen vuoden takuun jälkeen, bussille suoritetaan ”overhaul”-huolto ja liikennöintiä jatketaan vielä neljä vuotta (Tom Granvik, haastattelut). Bussien koriteknologian osalta sähköbussien korin voidaan olettaa kestävän suuriakin ajosuoritteita, sillä korien osalta Linkker Oy:n bussit perustuvat kestäväksi todettuun toimintansa lopettaneen bussinvalmistaja Kabus Oy:n teknologiaan (Kauppa-lehti 2016; Markku Ikonen, haastattelut).

Varsinaisena laskennassa käytettävän vuotuisen linjan 1 kuuden sähköbussin yhteisen ajosuoritteen pohjana käytettiin liikennöintisuunnitelman mukaista 614 247 kilometriä (Lauri Jorasmaa, sähköpostitiedonanto 6.4.2017). Ajosuoritetta korjattiin kymmenen prosentin suuruisella ajosuoritteen lisäyksellä huolto- ja siirtoajon vaikutuksen kattamiseksi (Juha Parkkonen, haastattelut).

Tiedonkeruun mukaista tarkasteluhetkeen saakka toteutunutta päivittäistä ajosuoritetta käytettiin lähinnä suhteutettaessa lataussykliä vuotuista lukumäärää tavoitteellista ajomäärää vastaavaksi, sekä antamaan suuntaa ajosuorituksen suhteen suoritettavan herkkystarkastelun mahdollisille olettamuksille. Saadun lataussykliä oletusarvoisen vuosilukumäärän sekä tiedonkeruusta luetun keskimääräisen SOC-muutoksen kautta johdettiin akun oletuskestoikä VTT:n tutkimusryhmän johtajan Mikko Pihlatien luoman kuvion 1 mukaisen latausten yhteydessä tapahtuvien akuston varaustilan muutoksiin perustuvan käyrän avulla. Käyrässä on Linkker LE13 -busseissa käytetyn LTO -teknologian lisäksi esitelty vastaava käyrä LFP -teknologialle. Pihlatien menetelmien mukaan akun kestoikää arvioitiin vain latauskiertoon perustuen, mahdollinen ajan kulusta aiheutuva vanheneminen sivuutettiin (Pihlatie ym. 2014).



Kuvio 1. Estimates of the life dependencies on the ΔSoC for LTO and LFP batteries. (Pihlatie ym. 2014)

Kuviosta voidaan nähdä akuston lataussyklipohjaisen käyttöiän kasvavan logaritmisesti varaustilan suhteellisen muutoksen pienentyessä, mikä tarkoittaa sitä, että tiheämmillä lataussykleillä akusto kykenee antamaan käyttöön huomattavasti enemmän kilowattitunteja elinikänsä aikana. Esimerkiksi joka kerta tyhjäksi ajamalla akusto kestäisi noin 13 000 lataussykliä, mikä bussien 55 kWh akustoilla tarkoittaisi 715 000 kilowattituntia,

mikä vastaisi noin 680 000 kilometriä. Keveämmillä, noin 20 % varaustilan muutoksilla taas saavutettaisiin noin 100 000 syklin käyttöikä, mikä vastaisi 1 100 000 kilowattituntia eli noin miljoonaa kilometriä.

Sähköbussiliikennöinnin vuosikulujen arvioinnissa otettiin huomioon ruuhkatukena käytettyjen kolmiakselisten bussien tuomat lisäkustannukset. Suunnitelman mukainen vuotuinen yhteinen ajosuorite linjalla on näiden osalta 79725 kilometriä (Lauri Jorasmaa, sähköpostitiedonanto 6.4.2017). Tämä suorite korjattiin niin ikään kymmenen prosentin lisäyksellä.

4.2 Dieselbussin TCO:n laskenta- ja tiedonkeruumenetelmät

Dieselbussien hankintahinnat perustuvat HSL:n Petri Saaren arvioihin uusien Euro 6 -päästöluokan kaksi- ja kolmeakselisten bussien hinnoista. Infrastruktuurille ei dieselbussien osalta lasketa erillistä hintaa, sillä ne eivät sen osalta tarvitse erillistä investointia, kuten esimerkiksi sähköbussien latausjärjestelmä.

Turun Kaupunkiliikenne Oy:n vuoden 2016 tilinpäätöksessä uuden bussin hankintahinnan poisto käsitellään 14 vuoden tasapoistona. Käyttämällä 14 vuoden käyttöikää ja linjan 1 keskimääräistä bussikohtaista ajosuoritetta saataisiin bussin kilometrimääräiseksi käyttöikäksi kuitenkin epärealistisen suuri lukema. Bussin vanhetessa se usein siirretään pienemmän ajosuoritteen linjoille tai lopulta vara-autoksi, sillä suurimmat päivittäiset ajosuoritteet kannattaa kilometrikohtaisten kulujen vuoksi kohdentaa ”fleetin” uusimmille busseille. Tässä tutkimuksessa dieselkäyttöisten bussien käyttöikä yksinkertaistetaan miljoonaan kilometriin, minkä yli kaupunkiliikenteessä ei dieselbusseilla normaalisti mennä. (Juha Parkkonen, haastattelut.)

Huollon kuluina käytettiin Petri Saaren arvioon perustuvia leasing-tyyppisten sopimusten kustannuksia. Leasing-sopimukset ovat yleistymässä uusien linja-autojen osalta niiden tarjotessa turvaa ja helppoutta liikennöitsijälle (Petri Saari, haastattelu 4.4.2017).

Kaksiakselisen bussin kulutus linjalla 1 perustuu linjalla tutkimuksen tekohetkellä liikennöivän Scania Omnibus 3200 dieselbussin kulutukseen. Kulutuksen arvo luettiin Turun kaupunkiliikenne Oy:n autokohtaisista tankkauspäiväkirjoista viiden kuukauden ajalta vähentäen Juha Parkkosen arvioon perustuva lisälämmittimen osuus kulutuksesta.

Urean keskimääräiselle kulutukselle suhteessa polttoaineenkulutukseen pyydettiin arvio Scania Suomi Oy:n huoltoinsinööri Michael Mannforsilta tankkaustiedon puuttuessa siltä osin.

4.3 Hiilijalanjäljen vertailun tiedonkeruu- ja laskentamenetelmät

Ajoneuvojen kilometrikohtaiset päästöt laskettiin energiamuotojen CO₂-ominaispäästö-kertoimien ja kilometrikohtaisen energiankulutuksen tulona.

Sähköbussien hiilijalanjäljen analysointiin tarvittavina CO₂-ominaispäästökertoimina käytettiin Turun Kaupunkiliikenne Oy:n ostaman Turku Energian pörssisähkön keski-määräistä hiilijalanjälkeä, sekä sähköntuotannon CO₂-ominaispäästöjen Tilastokeskuk-selta saatua kansallista viiden vuoden liukuvaa keskiarvoa.

Dieselbussien osalta käytettiin sekä fossiilisen dieselin CO₂-ominaispäästökerrointa, että kansallista keskiarvoa sisältäen noin 17 prosentin osuuden uusiutuvaa dieseliä (Tilasto-keskus 2017). Turun Kaupunkiliikenne Oy käyttää Teboil Oy:n toimittamaa fossiilista die-seliä (Rami Wahlsten, haastattelut).

Täysin uusiutuvien menetelmin tuotetun sähkön ja dieselin ominaispäästökertoimia ei tässä tutkimuksessa tarkasteltu, sillä niiden katsotaan olevan kokonaisuuden kannalta epärelevantteja tilanteessa, jossa niiden käyttäminen yksittäisessä kohteessa ei vaikuta merkittävästi energiantuotannon kokonaisrakenteeseen Suomessa.

Varsinaisen vuosittaisen tonnimääräisen säästön laskennassa käytetään tässä tutkimuk-sessa Tilastokeskukselta saatuja kansallisia ominaispäästökertoimien keskiarvoja. Las-kennassa otetaan huomioon myös suunnitellun mallin kolmiakselisilla dieselbusseilla suoritettavan ruuhkatuen päästöt. Tulosta ei kuitenkaan laajenneta yhtä vuotta pidem-mälle, sillä esimerkiksi siirtyminen ruuhkatuessa hybridibusseihin lähitulevaisuudessa muuttaisi vuosittaista säästöä tehden pitkistä tarkastelujaksoista spekulatiivisia.

5 AJOKILOMETRIN KUSTANNUSTEN VERTAILU

Sekä diesel- että sähköbussin TCO-laskenta noudattaa tässä tutkielmassa samaa kaavaa. Investoinnit ja vertailun kannalta merkittävät huoltokulut jaetaan bussien laskennalliselle lopulliselle ajosuoritteelle, ja sähköbussien vuosittaiset kulut jaetaan vuoden ajosuoritteelle. Ajosuoritteen vuosittaisena arvona käytetään linjan 1 laskennallista suunnitelmanmukaista bussikohtaista ajosuoritetta huolto- ja siirtoajon tarve huomioiden. Näihin kilometreihin kohdennettuihin kuluihin lisätään suoraan käytöstä johtuvat kulut, kuten diesel, urea sekä ladattu sähkö. Herkkyysanalyysillä pyritään kattamaan erilaisten käyttöikä- ja ajosuoriteskenaarioiden vaikutus elinkaarikustannuksiin sekä valaisemaan eri tahojen kulujen yhteiskertymää.

TCO-vertailun tuloksissa esitettyjä pilottihankkeen ja sitä edeltäneen liikennöintimallin kuluja ei kuitenkaan voi verrata suoraan, mikäli halutaan tietää liikennöinnin kokonaiskulut. Entisen ja nykyisen liikennöintimallin linjatunnit poikkeavat liikennöintitiheyden ja vaaditun ajosuoritteen vuoksi, millä on jotakuinkin suora vaikutus liikennöinnin henkilöstökuluihin. Vuonna 2015 linjatunteja linjalla 1 syntyi 29 639 ajosuoritteella 540 332 km, ja nykyisen liikennöintisuunnitelman mukaisesti niitä syntyisi 42 836 (Föli 2016; Lauri Jorasmaa, sähköpostitiedonanto 6.4.2017).

Liikennöinnistä saatavien korvausten eroja sähkö- ja dieselbussien välillä ei oteta tämän tutkimuksen laskelmissa huomioon, sillä niiden välinen ero on linjan 1 pääkierron bussien osalta tällä hetkellä marginaalinen. Korvaus liikennöitsijälle muodostuu pääoma- ja yleiskuluihin perustuvasta autopäiväkorvauksesta, henkilöstökuluihin perustuvasta ajotuntikorvauksesta, sekä huolto- ja energiakustannuksiin perustuvasta kilometrikorvauksesta. Sähköbussien osalta autopäiväkorvaus on suurempi, vaikka sen suuruudessa on otettu huomioon hankkeelle osoitetut tuet. Kilometrikorvaus on taas vastaavasti pienempi. (Juha Parkkonen, haastattelut.)

Kaikki tutkimuksessa esiintyvät kulut on esitetty arvonlisäverottomina. Sähkö- ja polttoaineverot ovat laskennassa mukana niiden ollessa vähennyskelvottomia.

5.1 Dieselbussin laskennan arvot

Uuden kaksiakselisen Euro 6 -luokan bussin ostohintana käytettiin arvoa 225 000 €, ja kolmiakselisen Euro 6 -luokan ostohintana arvoa 260 000 € (Petri Saari, haastattelu 4.4.2017). Dieselbussin investointiosa jaetaan tässä tutkimuksessa miljoonalle ajokilometrille. Miljoonan kilometrin jälkeistä bussin jäännösarvoa ei oteta tässä tutkimuksessa huomioon kaupunkiliikenteen bussien jäännösarvon ollessa melko merkityksetön (Juha Parkkonen, haastattelut).

Uusien dieselbussien leasing-tyyppisten huoltosopimusten kilometrikohtaiset kustannukset perustuvat HSL:n kalustoinsinööri Petri Saaren kokemuseräiseen arvioon. Kaksiakselisen bussin osalta huollon kustannuksena käytetään arvoa 20 snt/km, ja kolmiakselisen osalta 23 snt/km (Petri Saari, haastattelu 4.4.2017).

Kaksiakselisen dieselbussin kulutuksen arvona käytettiin tankkauspäiväkirjoihin perustuvaa lisälämmittimen vaikutuksen poiston mukaan redusoitua arvoa 36 l/100 km. Kolmeakselisen bussin kulutuksena käytettiin LS-liikennelinjat Oy:n vanhan liikennöintisopimuksen aikaisen kulutuksen keskiarvoa 42,5 l/100km (Kimmo Heinonen, haastattelu 29.3.2017). Urean kulutus suhteutettiin dieselin toteutuneeseen kulutukseen ollen viisi prosenttia kulutetun dieselin määrästä (Mikael Mannfors, sähköpostitiedonanto 13.3.2017). Dieselin hintana käytetään Turun Kaupunkiliikenne Oy:lle osoitetusta laskusta luettua arvoa 1,04 €/l, ja urean hintana vastaavasti arvoa 0,42 €/l (Juha Parkkonen, haastattelut).

Dieselbussien osalta ei tutkimuksessa suoriteta herkkyystarkastelua.

5.2 Sähköbussin laskennan arvot

Sähköbussien ostohinta on tarjouksen mukainen 525 000 € kappaleelta (Turun kaupunki 2015). Investointi käsitellään tämän tutkimuksen herkkyystarkastelussa liikennöintisopimuksen ja sen kolmen vuoden option mukaisesti seitsemän ja kymmenen vuoden tasapoistoina, sekä optimistisen skenaarion mukaisena 14 vuoden tasapoistona. Jäännösarvoa ei oteta huomioon.

Akuston kestoikä tiedonkeruujärjestelmän arvoista luetuilla akuston varustilan keskimääräisillä noin 25 %:n muutoksilla olisi kuvion 1. baseline-käyrän mukaan noin 80 000 lataussykliä, mikä suunnitelmanmukaisilla vuosittaisilla ajosuoritteilla tarkoittaisi noin yhdeksän vuoden kestoikää. Optimistic-käyrän mukainen noin 100 000 syklin kestoikä tarkoittaisi noin 11 vuoden kestoikää, mikä olisi linjassa Linkkerin akustolle myöntämän kymmenen vuoden takuun kanssa.

Huollon hintana on Linkkerin ja Turun Kaupunkiliikenne Oy:n välisen huoltosopimuksen mukainen 2 snt/km, johon lisätään 2 snt/km rengas- ja rengastyökulut. Kymmenen käyttövuoden jälkeiseksi huollon kuluksi oletetaan huoltosopimuksen päätyttyä 11 snt/km (Pihlatie ym. 2014). Tämän lisäksi 14 vuoden skenaariossa huollon osuuteen jyvitetään 100 000 € maksavan ”overhaul”-huollon kustannukset (Tom Granvik, haastattelut). Suorituskyvyltään vastaavan akuston hinta-arvio kymmenen vuoden päästä on 60 000 € muun teknisen sekä yleisilmeeseen liittyvän parantelun maksaessa arviolta 40 000 € (Tom Granvik, haastattelut).

Tutkimuksen aikainen keskimääräinen energiankulutus oli 1,04 kWh/km. Energian hinta sisältäen perusmaksun, pätötehon, siirtomaksun, sähköveron, energian sekä palvelumaksut on Turku Energian taholta arvioitu kumuloitumaan tavoitteellisella vuosikulutuksella arvoon 8,64 snt/kWh (Panu Aho, haastattelut).

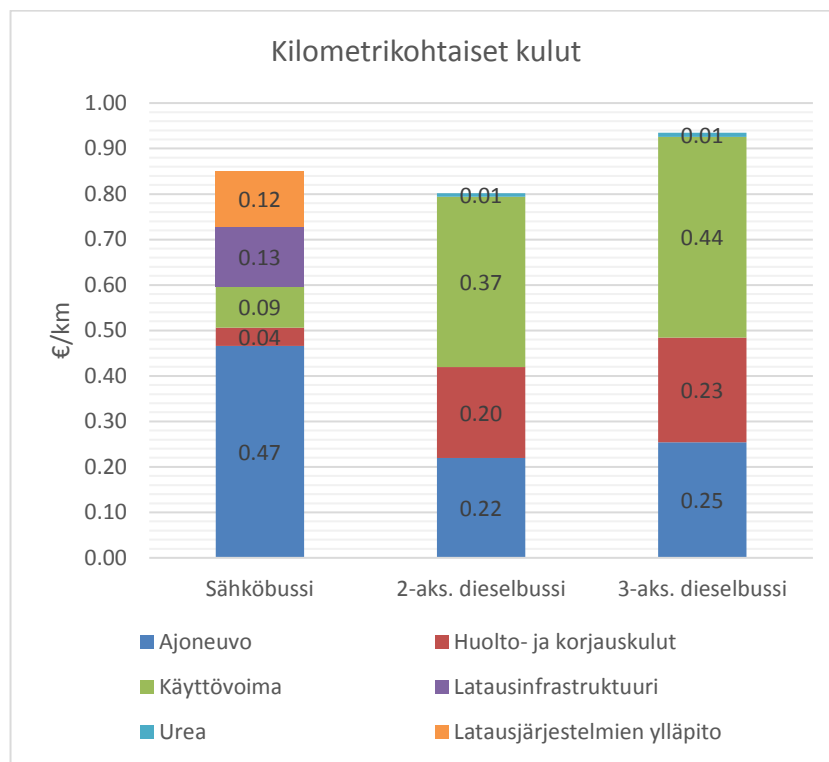
Latausinfrastruktuurin investointiosa ja latausasemien huolto laskutetaan Turku Energian toimesta Turun kaupungilta, joten tässä työssä tarkastellaan erikseen pilottihankkeen sähköbussiliikenteen kokonaiskilometrikustannuksia, ja Turun Kaupunkiliikenne Oy:n maksettavaksi jääviä kustannuksia. Latausinfrastruktuuri laskutetaan seitsemän vuoden aikana 126 166 € vuosittaisena investointiosana, ja huolto-, ylläpito- ja tutkimuksen tuen kulut 82 780 € vuosittaisena maksuna. Nämä latausjärjestelmän lopulliset kulut ylittävät alkuperäisen hinta-arvion (180 000 €) noin 16 prosentilla. (Tksjlk. 2016d.)

Latausjärjestelmän käyttöikä sidotaan tässä tutkimuksessa tutkittavien bussien käyttöikäskenaarioihin, sillä niiden käytettävyydestä pilottihankkeen jälkeisenä aikana ei ole varmuutta.

5.3 TCO-vertailu

Linjalla 1 käytettyjen eri bussityyppien kalustokohtaisen ajokilometrin hinta esitellään kuviossa 2. Kokonaishinta on eritelty osatekijöihin mukaan lukien sekä liikennöitsijän että

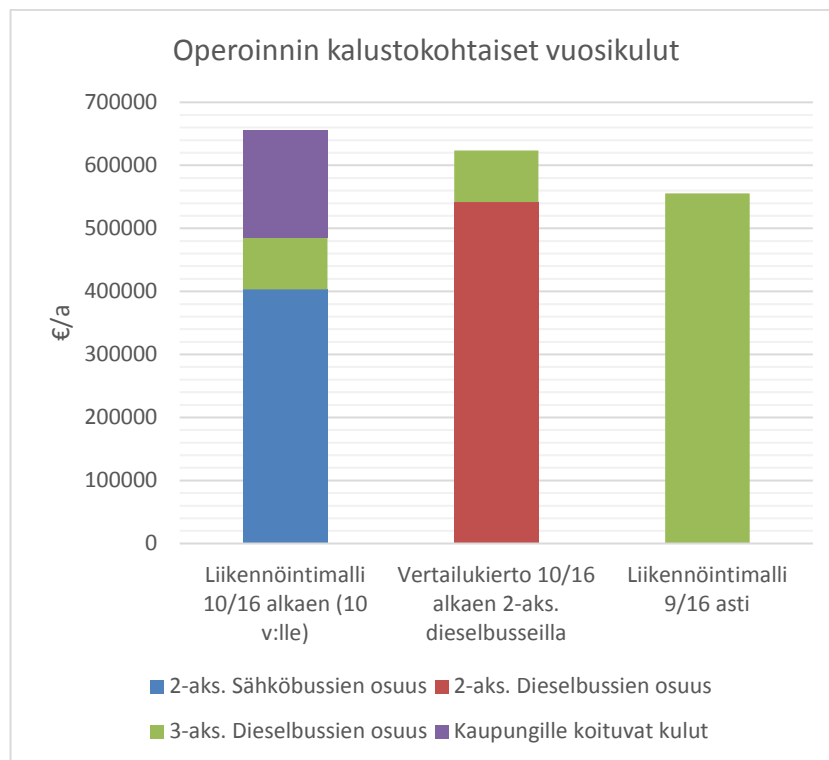
liikennöinnin tilaajan kulut. Dieselbussit ovat laskennan kuvauksen mukaisia Euro 6 - luokan bussien tyyppiesimerkkejä. Sähköbussin kulut perustuvat kolmella vuodella jatkettun liikennöintisopimuksen mukaiseen kymmenen vuoden käyttöikään, sekä liikennöintisuunnitelman mukaiseen huolto- ja siirtoajokertoimella korjattuun vuosittaiseen ajo-suoritteeseen.



Kuvio 2. Vaihtoehtoisten bussien ajokilometrin hinta.

Kuviossa käytetyn skenaarion mukaisesti laskettuna sähköbussin kokonaiskulut ovat hieman korkeammat kuin vastaavankokoisen uuden dieselbussin kokonaiskulut. Sähköbussien latausjärjestelmien infrastruktuurin ja ylläpidon kustannukset ovat liikennöinnin tilaajana toimivan Turun kaupungin vastuulla. Tällöin liikennöitsijän vastuulle jääneet kulut ovat sähköbussilla selkeästi dieselbussin kuluja kilpailukykyisemmät kuviossa käytetyillä laskentaparametreilla tarkasteltuna.

Linjan 1 operoinnista syntyvät kumulatiiviset kalustokohtaiset vuosikulut esitellään kuviossa 3. Kuluissa on otettu huomioon dieselkäyttöisillä telibusseilla suoritetun ruuhkatuen kustannukset, sekä sähköbussien osalta myös liikennöinnin tilaajan kulut. Liikennöinnin tilaajan kuluihin lukeutuu tässä tapauksessa latausinfrastruktuurin investointiosa sekä ylläpito. Esitetyt kulut perustuvat samaan skenaarioon kuin kuvion 2 kulut.



Kuvio 3. Linjan 1 operoinnista syntyvät vuosittaiset kalustokohtaiset kulut.

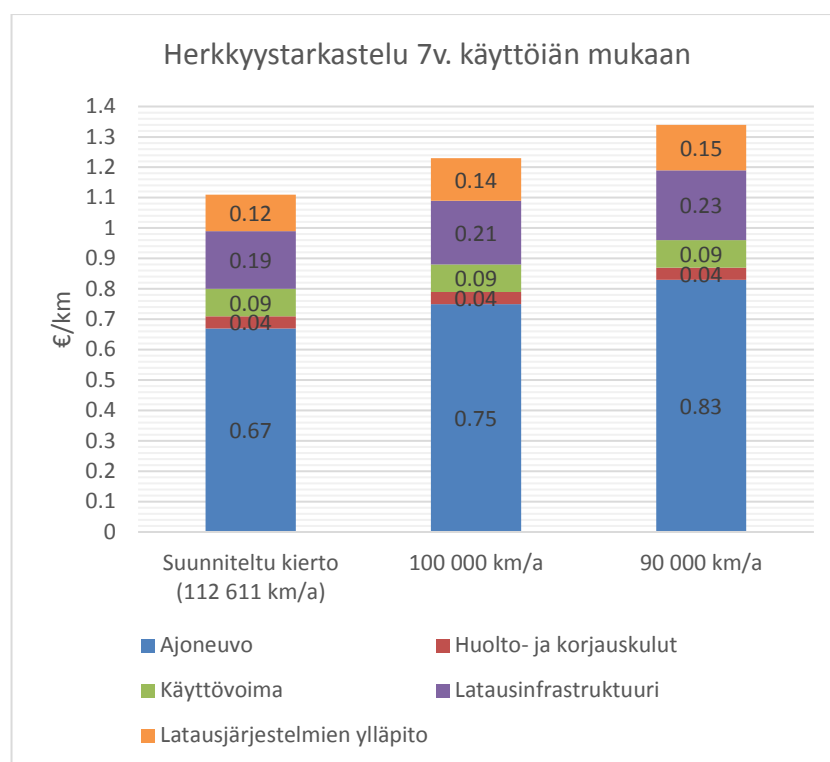
Kuviosta nähdään, että mikäli sähköbusseilla saavutetaan suunnitellun kierron mukainen vuosittainen ajosuorite ja busseja kyetään hyödyntämään linjalla kymmenen vuoden ajan, syntyy liikennöitsijälle merkittävät säästöt kalustokohtaisissa kuluissa. Liikennöitsijän ja Liikennöinnin tilaajana toimivan Turun kaupungin kalustokohtaiset yhteiskulut ovat kuitenkin selkeästi suuremmat kuin pilottihanketta edeltäneen syyskuuhun 2016 asti voimassa olleen liikennöintimallin mukaiset vuosikulut.

5.4 Herkkyysanalyysi

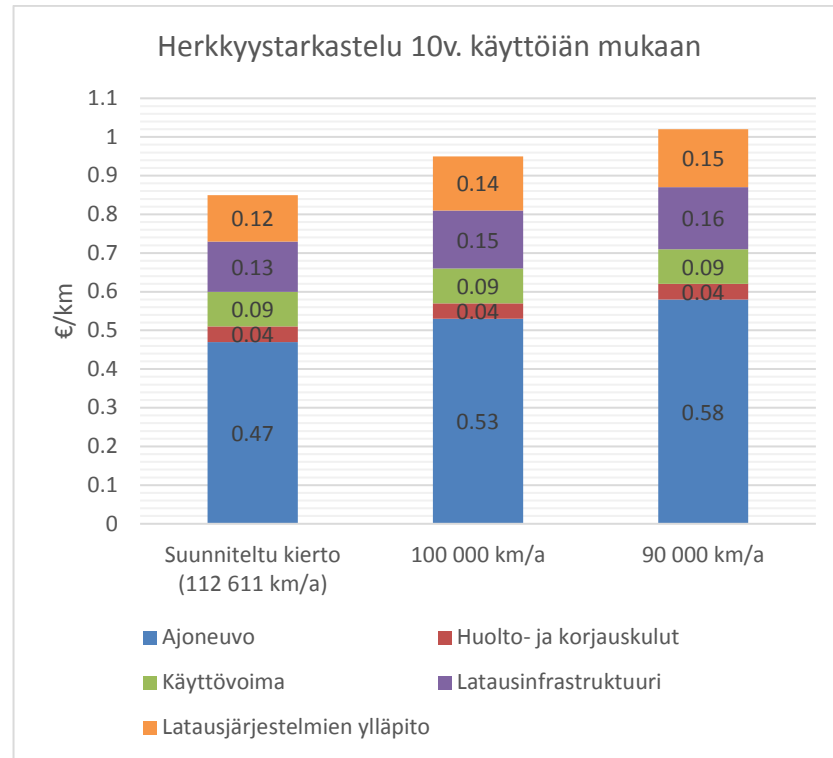
Erilaisten skenaarioiden vaikutusta käytössä olevien Linkker LE13-sähköbussien kilometrikustannuksiin eritellään kuvioissa 4, 5 ja 6. Jokaisen tarkasteltavan käyttöiän osalta kuvioissa esitetään vuosittaisten ajosuoritteiden mukaiset skenaariot, joiden kautta havainnollistetaan bussien koko elinkaaren ajosuoritteen vaikutusta kilometrikustannuksiin.

Pessimistisin käyttöikäskenaario on seitsemän vuotta liikennöintisopimuksen peruskes-
ton mukaisesti. Optimistisin 14 vuoden skenaario perustuu Granvikin esittämään mah-
dollisuuteen bussien päivittämisestä ja uudelleenkilpailutuksesta liikennöintisopimuksen
maksimikeston ja akuston kymmenen vuoden takuun päättymisen jälkeen.

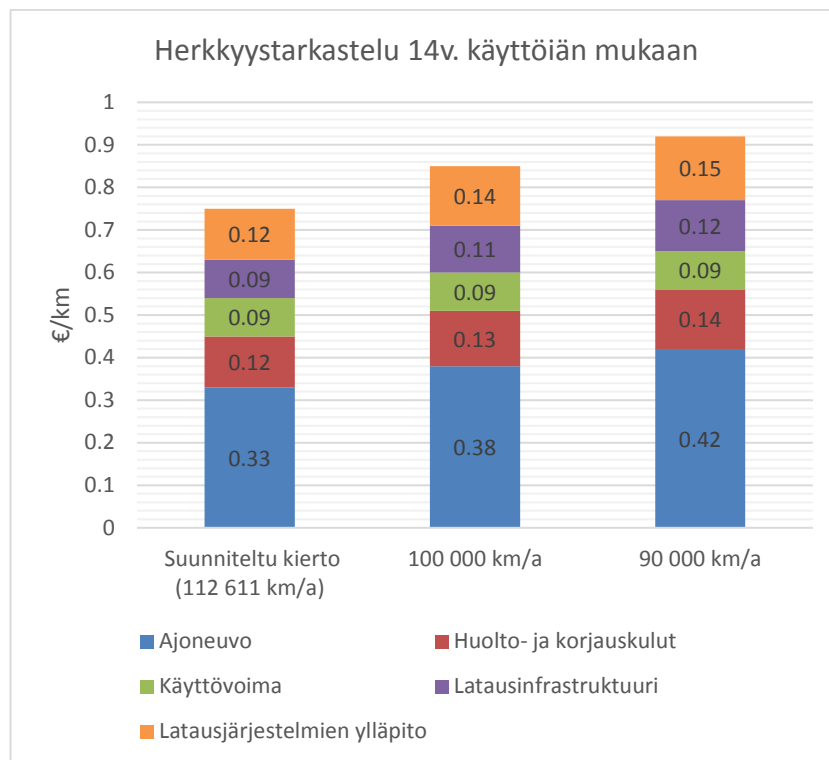
Ajosuoritteen suurin arvo on liikennöintisuunnitelman mukainen ajosuorite huolto- ja siir-
toajokertoimella korjattuna, ja pienemmät vuotuiset ajosuoritteet havainnollistavat bus-
sien käytettävyyden vaikutusta kokonaiskustannuksiin. Bussien toteutuneeseen ajosu-
oritteeseen vaikuttaa bussien ja latausinfrastruktuurin käyttövarmuus sekä mahdolliset lii-
kennöintisuunnitelman korjaukset.



Kuvio 4. Kilometrikohtaisten kustannusten herkkyytarkastelu 7 v. käyttöikäskenaarion mukaan.



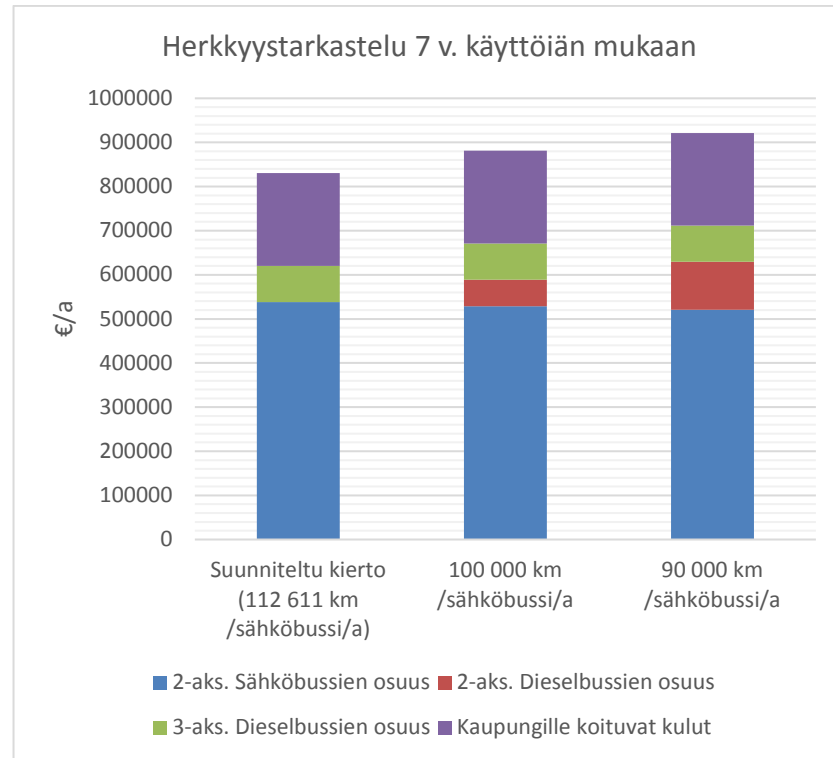
Kuvio 5. Kilometrikohtaisten kustannusten herkkyytarkastelu 10 v. käyttöikäskenaarion mukaan.



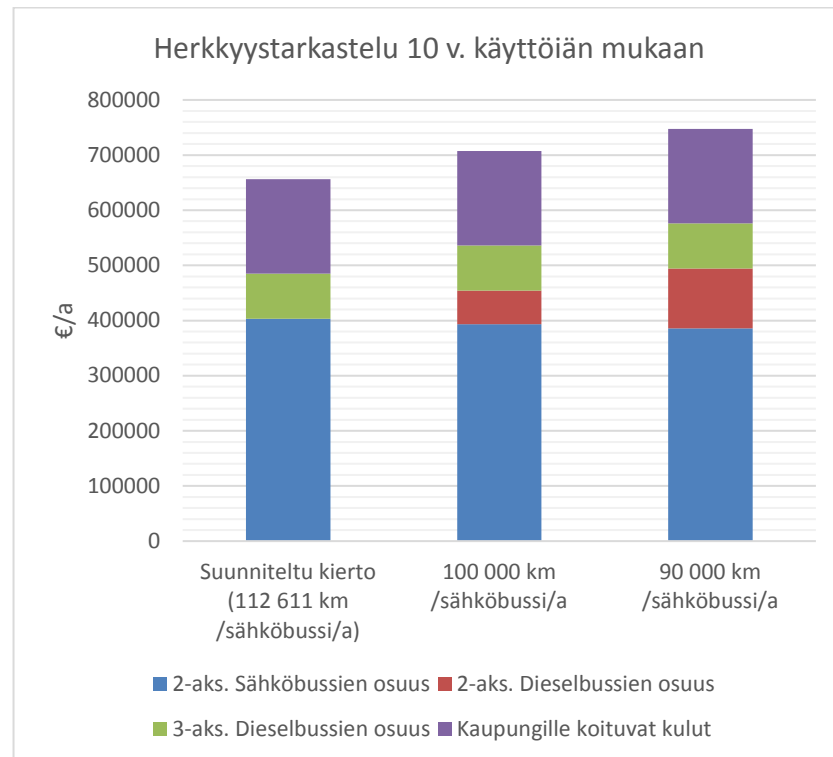
Kuvio 6. Kilometrikohtaisten kustannusten herkkyytarkastelu 14 v. käyttöikäskenaarion mukaan.

Esitettyjen tulosten mukaan sähköbussi vastaa liikennöitsijälle koituvilta kilometrikuluiltaan (pylvään neljä alinta osaa) vastaavan kokoista dieselbussia (kuvion 2 Vertailukierto 10/16 alkaen 2-aks. dieselbussilla) jo seitsemän vuoden skenaariolla sillä edellytyksellä, että liikennöintisuunnitelman mukaiset ajosuoritteet saavutetaan. Mikäli kymmenen vuoden käyttöikä saavutetaan, on bussien vuotuisessa ajosuoritteessakin liikkumavaraa. Kaikkien tahojen kokonaiskustannusten näkökulmasta vastaavan dieselbussin kustannusten alittaminen edellyttää kuitenkin Granvikin skenaarion mukaista kymmenen vuoden jälkeen jatkettavaa liikennöintiä.

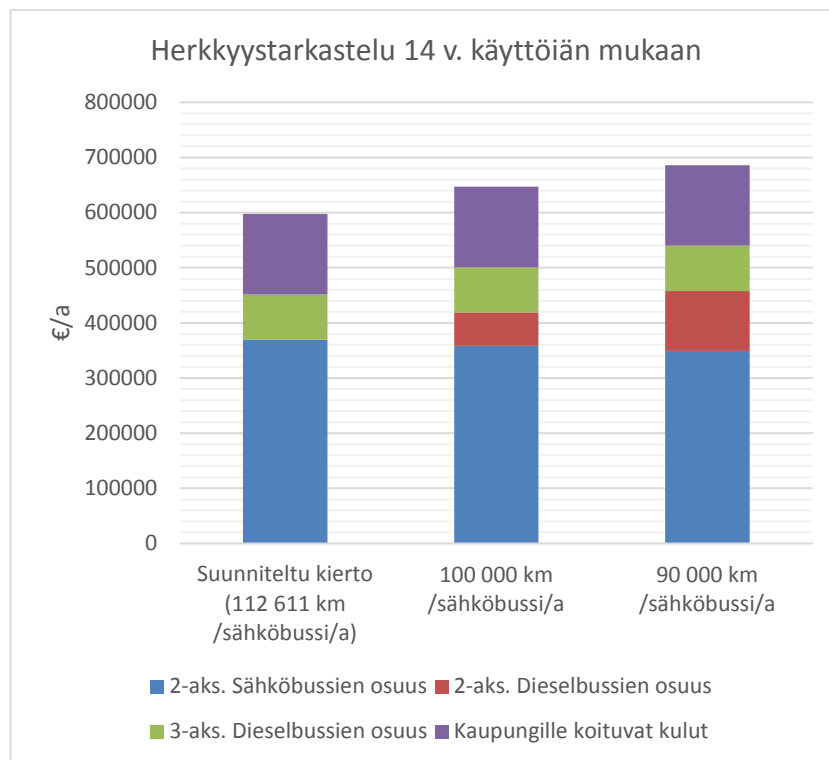
Kuvioissa 7, 8 ja 9 esitetään edellä olevien kuvioiden skenaarioilla lasketut herkkyytarkastelut vuosittaisista liikennöinnin kalustokohtaisista kustannuksista tilaajan kulut huomioiden.



Kuvio 7. Linjan 1 liikennöinnin vuosikulut 7 v. käyttöikäskenaarion mukaan.



Kuvio 8. Linjan 1 liikennöinnin vuosikulut 10 v. käyttöikäskenaarion mukaan.



Kuvio 9. Linjan 1 liikennöinnin vuosikulut 14 v. käyttöikäskenaarion mukaan.

Yksi suurimmista liikennöitsijän kuluja nostavasta muutoksesta on vuorovälin tihentäminen kaksiakselisiin busseihin siirryttäessä kuljetuskapasiteetin säilyttämiseksi. Mikäli vuorovälin tihentämistä perusteltaisiin palvelutason parantamisella, jolloin pääkierron liikennöinti ilman sähköistämistäkin tapahtuisi kaksiakselisilla dieselbusseilla (kuvio 3, Vertailukierto 10/16 alkaen 2-aks. dieselbusseilla), olisi liikennöitsijän kannalta edullisempaa käyttää sähköbussia jo seitsemän vuoden skenaariolla. Tämä edellyttäisi kuitenkin suunnitelmanmukaista vuotuista ajosuoritetta ilman radikaaleja häiriöitä. Kilpailtaessa kaksiakselisin ajoneuvoin operoitavista kilpailutetuista linjoista olisi täten Liikennöitsijällä näiden laskelmien mukaan mahdollisuus voittaa kilpailutus sähköbussilla jo tämänhetkisillä hinnoilla, kunhan latausjärjestelmä olisi kaupungin tarjoama.

Pilottihanketta edeltäneeseen liikennöintimalliin verrattaessa sähköbussien kilpailukykyisyys edellyttäisi kalustokustannusten osalta kuitenkin sopimuksen jatkamista seitsemän vuoden jälkeen. Kolmen vuoden sopimusjatkolla sähköbussit kuitenkin kestäisivät jo pieniä häiriöitä ajosuoritteessakin säilyttäen edullisuutensa kalustokohtaisten kulujen osalta.

Mikäli tarkastellaan liikennöitsijän ja liikennöinnin tilaajan yhteiskuluja, on pilottihankkeen edellytyksillä lähes mahdotonta saavuttaa kalustokulujen osalta säästöä edelliseen liikennöintimalliin verrattuna. Liikennöinnin tilaajan vastuulla olevien latausjärjestelmän kustannusten voidaan kuitenkin olettaa laskevan huomattavasti tulevaisuuden hankkeissa korkeamman käyttöasteen sekä alhaisempien investointihintojen myötä (Kimmo Erkkilä, sähköpostitiedonanto 22.5.2017).

Verrattaessa pilottihankkeen vuosikuluja on kuvioissa näkyvien kalustokohtaisten vuosikulujen lisäksi otettava huomioon myös linjatuntien kasvanut määrä, mikä nostaa merkittävästi henkilöstökuluja.

6 HIILIJALANJÄLJEN VERTAILU

6.1 Eri energiantuotantotapojen vaikutus

Todellista päästövähennemää tutkittaessa kirjoittaja näkee päästökertoimien kansalliset keskiarvot merkittävämpinä mittareina kuin yksittäisten energiantuotantotapojen päästökertoimet. Päästövähennemän laskenta päästöttömällä sähköllä olisi olennaista vain sillä edellytyksellä, että päästöttömän sähkön tilaaminen yksittäiseen kohteeseen vaikuttaisi lyhentämättömästi sen tuotantomäärään ja osuuteen Suomessa tuotetusta sähköstä.

Tämänhetkisten sopimusten mukaan Turun Kaupunkiliikenne Oy:n dieselautot tankataan Teboilin toimittamalla fossiilisella dieselillä, ja sähköautot ladataan alustavista suunnitelmista poiketen Turku Energian toimittamalla ”pörssisähköllä” ilman vaatimuksia tuotantotavoista (Rami Wahlsten, haastattelut).

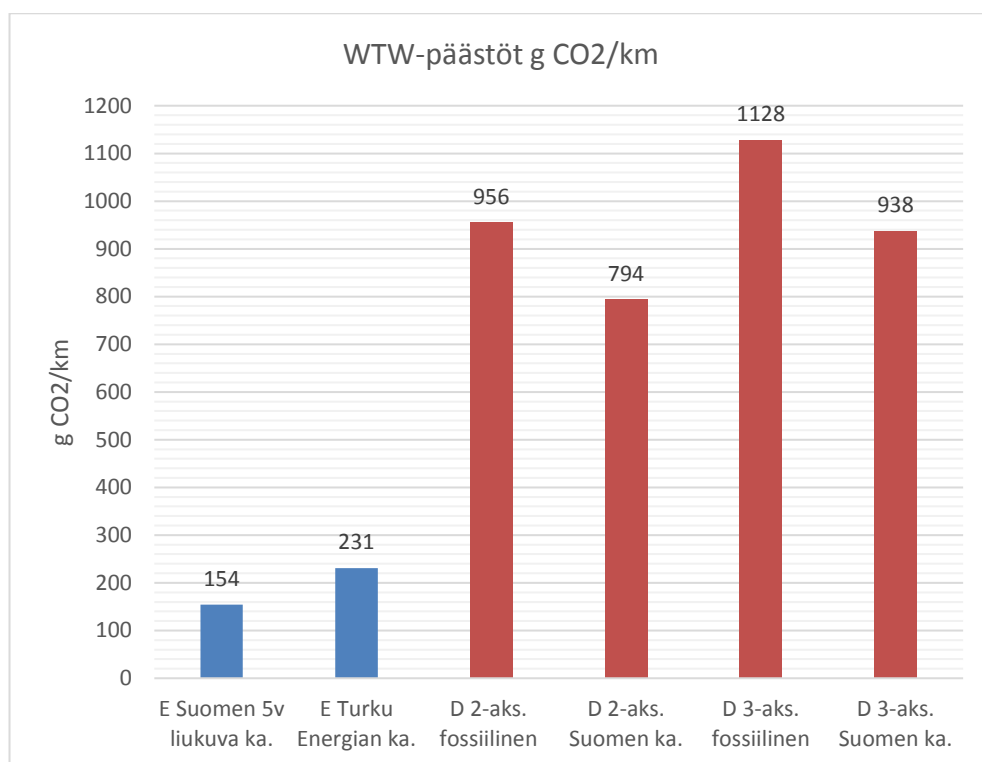
Laskennassa käytetyt sähköenergian ominaispäästökertoimet ovat kansallinen viiden vuoden liukuva keskiarvo 147 g CO₂/kWh, sekä Turku Energian toimittaman sähkön keskiarvo 220 g CO₂/kWh (Tilastokeskus 2015; Turku Energia 2015). Dieselin osalta kertoimet ovat fossiilisen dieselin 264,6 g CO₂/kWh sekä kansallisen keskiarvon mukaisen 17 % uusiutuvan osuuden sisältävän dieselin 220,0 g CO₂/kWh (Tilastokeskus 2017).

6.2 Eri ajoneuvotyyppien ja niiltä vaaditun kilometrisuoritteen vaikutus

Entisen liikennöintisopimuksen aikana linjaa 1 operoitiin kolmiakselisilla 15-metrisillä dieselbusseilla, jolloin suuremmasta kuljetuskapasiteetista johtuen liikennöintiin riitti harvempi vuoroväli, jolloin kolmiakselisen bussin kilometrikohtaiset päästöt eivät ole suoraan vertailukelpoisia tutkittujen sähköbussien päästöjen kanssa. Vuoden 2015 toteutunut ajosuorite linjalla 1 oli 540 332 km (Föli 2016). Bussikohtainen kulutus oli kuitenkin vastaavasti suurempi, noin 42,5 l/100km (Kimmo Heinonen, haastattelu 28.3.2017). Vuotuinen tonnimääräinen hiilidioksidisäästö linjalla 1 onkin täten kirjoittajan näkökulmasta olennaisempaa suhteuttaa näihin tietoihin Turun kaupunginhallituksen kokouksen 25.5.2015 § 233 pöytäkirjan liitteen laskentamallin sijasta.

6.3 Tulokset

Energiankulutukseen perustuvat kilometrikohtaiset hiilidioksidipäästöt esitetään kuviossa 10 sekä ominaispäästökertoimien kansallisten keskiarvojen että kohteissa tutkimuksen tekohetkellä käytettyjen energialähteiden ominaispäästökertoimien mukaisesti. Päästöt on esitetty tässä tutkimuksessa ainoastaan kokonaisuuden kannalta ratkaisevammasta WTW-näkökulmasta.



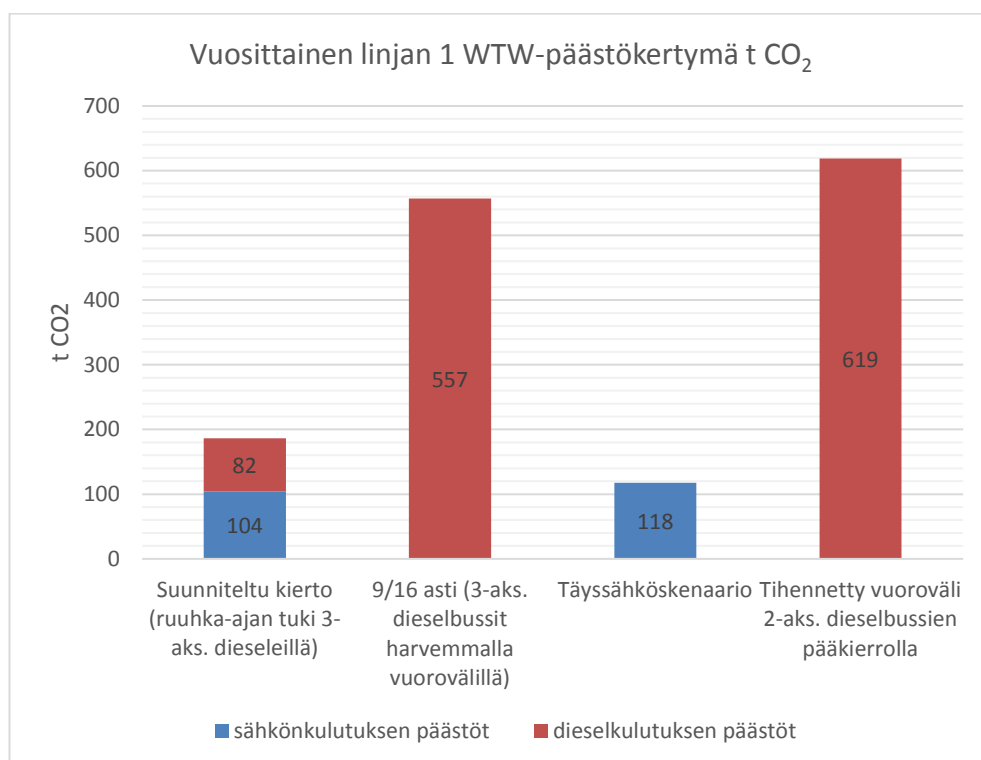
Kuvio 10. Kilometrikohtaiset WTW-näkökulman CO₂-päästöt.

Sähköbussien kilometrikohtaisten WTW-päästöjen voidaan todeta olevan vain noin viidesosa dieselbussien päästöistä kansallisten keskiarvojen mukaan mitattuna.

Vuotuiset tonnimääräiset linjan 1 operoinnista syntyvät CO₂-päästöt on esitetty kuviossa 11. Vuosittaisten päästöjen arvot perustuvat ominaispäästökertoimien kansallisiin keskiarvoihin. Sekä vuonna 2015 toteutunut ajosuorite että pilottihankkeen suunnitelman mukaiset ajosuoritteet (luvut 4.1, 5, 6.3) on korjattu kymmenen prosentin korotuksella huolto- ja siirtoaajon vaikutuksen huomioimiseksi. Nykyisen pilottihankkeen mukaisessa

mallissa on myös otettu huomioon ruuhkatuen 79 725 km:n ajosuorite, mikä Turun kaupunginhallituksen kokouksen 25.5.2015 § 233 pöytäkirjan liitteessä on jätetty huomiotta. (Lauri Jorasmaa, sähköpostitiedonanto 6.4.2017)

Kuviossa esitetään vertailun vuoksi myös spekulatiiviset skenaariot täysin sähköisestä operoinnista, sekä kaksiakselisen dieselbussein kolmiakselisten ruuhkantuella toteutetusta operoinnista. Täyssähköskenaariossa on ruuhkatuen päästöt muista skenaarioista poiketen laskettu mitattavissa olleiden kaksiakselisten sähköbussien päästöjen mukaan.



Kuvio 11. Vuosittaiset linjan 1 operoinnista syntyvät WTW-näkökulman mukaiset CO₂-päästöt.

Kuviossa 11 esitettyjen arvojen perusteella linjan 1 muutoksilla saavutettava vuotuinen päästövähennys olisi noin 370 t CO₂, mikä vastaisi esimerkiksi vuonna 2016 rekisteröityjen uusien henkilöautojen keskimääräisten hiilidioksidipäästöjen mukaan laskettuna yli kolmen miljoonan ajokilometrin päästöjä kyseisillä ajoneuvotyypeillä (Trafic 2017). Määrä on merkittävä, mutta poikkeaa olennaisesti taulukon 2 mukaisista luvuista. Poikkeavuuteen vaikuttaa osaltaan ruuhkatuen sekä kuljetuskapasiteetiltaan pienempien sähköbussien kasvaneen ajosuoritetarpeen huomiointi tämän tutkimuksen

laskelmissa. Lisäksi linjan 1 dieselliikennöinnin toteutuneet kulutukset ovat huomattavasti kaupunkiliikennöinnin keskimääräistä kulutusta pienemmät, mikä alentaa suoraan kilometrikohtaisia CO₂ -päästöjä.

7 TUTKIMUKSEN ARVIOINTI

Tämän tutkimuksen tuloksien soveltaminen sinällään tulevaisuuden investointien kannattavuuden tarkasteluun on haastavaa monesta syystä. Tutkimuksessa on useita muuttujia, jotka vaikeuttavat tulevien hankkeiden kustannusten arviointia tämän tutkimuksen tuloksiin perustuen. Esimerkiksi eri energiamuotojen hinnankehitys on altis vaikeasti ennustettaville muutoksille. Tämän lisäksi kyseessä on pilottihanke, jossa ylimää räisiä kustannuksia liikennöintiin syntyy usean eri tahon laskuttamasta tiedonkeruun ja tutkimuksen avunantoon sitoutumisesta, mikä nostaa hankkeen kokonaiskustannuksia. Sähköbussien yleistyessä näiden kuluerien voidaan olettaa jäävän pois. TEKES on myöntänyt Turun Kaupungille tukea 247 000 € edellä mainittujen kulujen kattamiseen, mutta tuet on jätetty tämän tutkimuksen laskelmien ulkopuolelle (Tksjlk 2016b). Lisäksi investointiosien voidaan odottaa laskevan radikaalisti jo lähivuosina.

Oman haasteensa tulosten validiudelle tuo myös tutkimuksen ajankohdan aikaisuus, josta johtuen sähköbussien kulueriä on suurelta osin arvioitu suunniteltujen ajosuoritteiden perusteella toteutuneiden sijaan. Tämä vaikuttaa suoraan tai välillisesti jaettaessa investointiosia kilometrikohtaisiksi kuluiksi. Toteutunut ajosuorite vaikuttaa myös energian toteutuneeseen hintaan jyvittäessä kiinteitä kuukausittaisia kuluja kilowattitunnin hintaan.

TCO-analyysiin yleisesti vaikuttava tutkittavan kohteen käyttöikä taasen on arvo, joka sähköbussien, ja niiden hintaan olennaisesti vaikuttavan akuston osalta pystytään tarkemmin määrittelemään vasta usean vuoden käytön jälkeen. Kokemusperäistä tietoa akustoista on saatavilla vain hybridibussien osalta, mutta kirjoittaja katsoo vuosia vanhan elinkaarensa päähän tulleen akkuteknologian vertaamisen tämänhetkiseen tai tulevaisuuden akkuteknologiaan epärelevantiksi. Lisäksi täyssähköbusseissa käytetyn LTO-teknologian osalta kokemusperäisen tiedon saanti on vielä haastavampaa.

Sähköbussien huolenpitosopimuksen verrattain halpa hinta on aiheuttanut epäilyksiä, mutta Linkkerin omissa laskelmissa tätä on kompensoitu ajoneuvon ostohinnassa, jolloin kirjoittaja katsoo asiaan puuttumisen tarpeettomaksi. Yleisesti huollon osuus on vaikeasti määriteltävissä liikennöitsijöiden osittain varjellussa tätä liikesalaisuuden piiriin kuuluvana tietona, jolloin vertailukohteet jäävät dieselbussienkin osalta vähäisiksi.

Tässä tutkimuksessa käytetyt latausjärjestelmien investointihinnat, ylläpidon kulut sekä käyttöikäskenaariot ovat ehkä suurin vertailtavuutta heikentävä osa-alue, kun pohditaan sähköbussien kustannuspotentiaalia tällä hetkellä. Pilottihankkeessa jokaisen lataus- aseman käyttöaste on vain noin puolet siitä mitä se voisi olla tilanteessa, jossa sähkö- bussikanta olisi suurempi, ja latausasemat sijoiteltu keskeisille alueille yksittäisen linjan päätepysäkkien sijasta. Lisäksi tutkimuksessa käytetyt latausjärjestelmien käyttöiät ovat siinä mielessä ankaria, että niiden käytettävyys jatkossa on todennäköisimmin mahdol- lista mekaanisten osien muutostöillä ja ylläpidolla. Sähköbussien yleistyessä on siis tur- vallista olettaa, että latausjärjestelmien kulut bussin ajokilometrille jaettuna tulevat oike- alla suunnittelulla laskemaan alle puoleen nykyisestä. (Kimmo Erkkilä, sähköpostitie- donanto 22.5.2017.)

Halvan huoltosopimuksen ja akuston kymmenen vuoden takuun osalta tutkimustulosten validius on kuitenkin suuresti riippuvainen Linkker Oy:n vakaudesta seuraavan kymme- nen vuoden aikana.

Edellä mainituista syistä johtuen tutkimuksella onkin eniten arvoa lähinnä nimenomaan tutkitun Fölin 1-linjan sekä vastaavien pilottihankkeiden kustannusten arvioinnissa lähi- tulevaisuudessa.

Päästöjen osalta tutkimustulokset eivät ole taloudellisen näkökulman tapaan herkkiä bussin käyttöiän suhteen, mutta tulosten paikkansapitävyys edellyttää sähköbusseilta tavoitteenmukaista vuosittaista ajosuoritetta. Tärkein huomionarvoinen muuttuja päästö- jen suhteen on eri energiamuotojen keskimääräisten ominaispäästökertoimien arvojen saatavuus viiveellä sekä niiden kehityksen ennustamisen haasteet. Tutkimuksessa ei myöskään ole otettu huomioon bussien komponenttien valmistuksesta syntyvien pääs- töjen eroavaisuuksia.

Täyssähköskenaarion päästömäärässä ruuhkatuki on laskettu mittauksen kohteina ollei- den kaksiakselisten sähköbussien mukaan, mikä osaltaan vaikeuttaa tulosten vertailta- vuutta kuljetuskapasiteetin joutuessa ruuhkatuen osalta sivuutetuksi. Oletusarvoisesti mahdollinen virhe on kuitenkin prosentuaalisesti melko pieni. Ruuhkatuen kuljetuskapa- siteetin pienenemisen merkitystä tulisi arvioida myös mittaamalla ruuhkatuen teliakselis- ten bussien täyttöastetta, jotta nähtäisiin, riittäisikö kaksiakselisen auton matkustamoka- pasiteetti ruuhkatuen pyöritykseen.

Päästöjen osalta on lisäksi huomioitava eriävät näkökannat sähköautoteknologian käyttöönoton todellisesta vaikutuksesta maailmassa poltetun fossiilisen polttoaineen määrään. Polttoaineiden jalostusketjusta johtuen valmistetun dieselin määrä ei ole pelkästään riippuvainen sen kysynnän kehityksestä suuremman jalostusasteen tuotteiden kysynnän kasvaessa. Tällöin ”ylimääräinen” diesel poltettaisiin kehittyvissä maissa. (Yle 2016).

8 YHTEENVETO

Opinnäytetyö oli osa laajempaa Turun kaupungin Turun Ammattikorkeakoulu Oy:ltä tilaamaa eFÖLI-hankkeen tutkimuskokonaisuutta. Tavoitteena oli saavuttaa kattava kuva sähköbussiliikennöinnin kustannuksista ja päästöistä verrattuna perinteiseen dieseteknologiaan.

Lähteinä käytettiin kulutusmittauksia, laskutuksen mukaisia toteutuneita kuluja sekä tiedonkeruujärjestelmistä purettua dataa. Jäljelle jääneitä aukkoja paikattiin Henkilöliikennöinnin ammattilaisten ja tutkijoiden asiantuntijalausunnoilla, sekä hankkeen osapuolten yhteyshenkilöiltä saaduilla odotusarvoilla ja tiedoilla.

Tutkimuksen tulokset vastasivat pääpiirteiltään kirjoittajan odotuksia. Tulosten perusteella voidaan todeta, että tilanteessa, jossa linjatuntien määrää ei tarvitsisi lisätä dieselbussiliikennöintiin nähden, olisi liikennöitsijän mahdollista saavuttaa taloudellista kilpailuetua sähköbusseilla. Edellytyksenä tälle on kuitenkin noin 800 000 kilometrin elinkaariaikainen ajosuorite sähköbussille sekä pilottihankkeen mukainen malli, jossa kaupunki ottaa latausinfrastruktuuriin liittyvät kulut vastuulleen. Tätä skenaariota voidaan kuitenkin tutkimuksessa hyödynnetyn akuston käyttöikää mallintavan käyrän perusteella pitää täysin mahdollisena, vaikkei akustolle edes myönnettäisi Linkkerin takuusopimuksen mukaista kymmenen vuoden takuuta. Päätelmän pitävyyden edellytyksenä on kuitenkin sähköbussien osalta dieselbussiteknologiaa vastaava luotettavuus- ja käytettävyyssaste.

Liikennöinnistä syntyvien WTW-näkökulman CO₂ -päästöjen kannalta sähköbussiliikennöintiä voidaan pitää tutkimustulosten valossa kiistatta ylivertaisena dieselbussiliikennöintiin nähden. Dieselbusseilla suoritettavasta ruuhkatuesta huolimatta liikennöinnin kokonaispäästöt ovat vain noin viidesosa pilottihanketta edeltäneen liikennöintimallin mukaisista päästöistä.

Yleisesti tutkimuksella saavutettiin pilottihankkeen osalta kattava kuva eri skenaarioiden mukaisista liikennöinnin kalustosta riippuvista kustannuksista sekä sähköbussien tehokkuudesta ratkaisuna liikenteen kokonaispäästöjen vähentämiseen.

LÄHTEET

EU 2016. Energiaunioni ja ilmastotavoitteet: tavoitteena siirtää Eurooppa nopeammin vähähiiliseen talouteen. Viitattu 26.2.2017 http://europa.eu/rapid/press-release_IP-16-2545_fi.htm

Föli 2016. Turun seudun joukkoliikenteen toimintakertomus v. 2015. Viitattu 21.4.2017 <http://www.foli.fi/sites/default/files/Turun%20seudun%20joukkoliikenteen%20toimintakertomus%20v.%202015.pdf>

Heliox 2017a. Heliox HE9816003-01-810 v1.0, Heliox pikalaturin HE9816003 Käyttöohje.

Heliox 2017b. Heliox HE9815005-01-812 v2.0 draft 2, Heliox 50 kW hidaslaturin HE9815005 käyttöohje.

Kauppalehti 2016. Suomalainen sähköbussivalmistaja tavoittelee miljardibisnestä. Viitattu 4.3.2017 <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/suomalainen-sahkobussivalmistaja-tavoittelee-miljardibisnesta/AtwjUeh3>

Pihlatie ym. 2014. Fully Electric buses – the viable option. Viitattu 20.4.2017 <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/OA-Fully-Electric.pdf>

Schunk 2016. Schunk Bahn- und Industrietechnik GmbH, Schunk Virroitin Tyyppi SLS 201.102 Huolto- ja käyttöohje.

Tilastokeskus 2015. Energia ja päästöt, 12.3.2 Sähkön ja lämmön tuotannon CO₂- päästöt. Viitattu 16.3.2017 http://pxweb2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2015/html/suom0011.htm

Tilastokeskus 2017. Polttoaineluokitus 2017. Viitattu 16.4.2017 http://tilastokeskus.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html

Tksjlk 2016a. Turun kaupunkiseudun joukkoliikennelautakunnan kokouspöytäkirja 23.3.2016. Viitattu 28.3.2017 <http://ah.turku.fi/tksjlk/2016/0323004x/3370612.htm>

Tksjlk 2016b. Turun kaupunkiseudun joukkoliikennelautakunnan kokouspöytäkirja 23.3.2016. Viitattu 23.3.2017 <http://ah.turku.fi/tksjlk/2016/0504006x/3388385.htm>

Tksjlk 2016c. Turun kaupunkiseudun joukkoliikennelautakunnan kokouspöytäkirja 4.5.2016. Viitattu 23.3.2016 <http://ah.turku.fi/tksjlk/2016/0914011x/3436016.htm>

Tksjlk 2016d. Turun kaupunkiseudun joukkoliikennelautakunnan kokouspöytäkirja 21.12.2016. Viitattu 13.3.2017 <http://ah.turku.fi/tksjlk/2016/0608008x/3405514.htm>

Turku Energia 2015. Sähköenergian tuotanto ja alkuperä. viitattu 16.3. <http://www.turkuenergia.fi/sahko/tietoa-sahkostamme/energiantuotanto-ja-energian-alkupera/>

Turun Kaupunki 2015. Turun Kaupungin Hankinta- ja Logistiikkakeskus, Tarjousten kokonaistaloudellisen edullisuuden vertailu, diaarinumero 7947-2015.

Turun kaupunginhallitus 2015a. eFÖLI, sähköbussieihin perustuva liikennöintiratkaisu linjalle 1, kaupunginhallituksen kokouspöytäkirja 25.5.2015/1.6.2015. Viitattu 14.2.2017 <http://ah.turku.fi/kh/2015/0601015x/3249199.htm>

Turun kaupunginhallitus 2015b. Kaupunginhallituksen kokouspöytäkirja 1.6.2015 liite 1. Viitattu 14.2.2017 <http://ah.turku.fi/kh/2015/0601015x/Images/1386281.pdf>

Trafi 2014. Liikenteen päästöt ilmaan. Viitattu 26.3.2017 https://www.trafi.fi/tietopalvelut/arviointipalvelut/indikaattorit/ymparistoindikaattorit/liikenteen_paastot_ilmaan

Trafi 2017. Ensirekisteröityjen henkilöautojen keskimääräiset hiilidioksidipäästöt. Viitattu 29.4.2017 [http://katsaukset.trafi.fi/etusivu/kestavyys/ensirekisteroityjen-henkiloautojen-keski-
maaraiset-hiilidioksidipaastot.html](http://katsaukset.trafi.fi/etusivu/kestavyys/ensirekisteroityjen-henkiloautojen-keskimaa-raiset-hiilidioksidipaastot.html)

Yle 2016. Analyysi: "Sähköautot eivät vähennä päästöjä yhtään". Viitattu 20.4.2017 <http://yle.fi/uutiset/3-9241906>

Yle 2017. Suomen ensimmäiset pikaladattavat sähköbussit Espooseen. Viitattu 26.4.2017 <http://yle.fi/uutiset/3-8519256>